引用格式：蔡睿, 朱汉雄, 李婉君, 等. “双碳”目标下能源科技的多能融合发展路径研究. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 502-510.
Cai R, Zhu H X, Li W J, et al. Development path of energy science and technology under “dual carbon” goals: Perspective of multi-energy system integration. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 502-510. (in Chinese)

# “双碳”目标下能源科技的多能融合发展路径研究



蔡 睿　朱汉雄　李婉君　肖 宇　刘中民*

中国科学院大连化学物理研究所　大连　116024

**摘要**　文章首先从必要性和紧迫性两方面分析我国实现“双碳”目标的驱动因素，提出要实现“双碳”目标就必须科学有序重构我国能源结构及相关工业体系，其中科技创新将发挥至关重要的引领作用；随后基于中国科学院能源领域的长期研究基础，提出以多能融合理念引领“双碳”目标实现的科技发展路径，并详细阐述了多能融合理念内涵和化石能源清洁高效利用与耦合替代、非化石能源多能互补与规模应用、工业低碳/零碳流程再造、数字化/智能化集成优化4条多能融合科技路径；最后提出了推进多能融合科技发展路径实施的建议。

**关键词**　碳中和，“双碳”目标，能源，工业，科技发展路径，多能融合

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20220215001

2020年9月22日，习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上郑重宣示：中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。实现碳达峰、碳中和（以下简称“双碳”），是以习近平同志为核心的党中央统筹国内国际两个大局作出的重大战略决策，是着力解决资源环境约束突出问题，实现中华民族永续发展的必然选择，是构建人类命运共同体的庄严承诺。

二氧化碳排放与能源资源的种类、利用方式和利用总量直接相关。我国成为全球碳排放量最大国家的根本原因在于能源及其相关的工业体系主要依赖化石

*通信作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA21000000）
修改稿收到日期：2022年4月4日

资源。为此，科学有序推进能源结构及相关工业体系从高碳向低碳、绿色发展，形成先进的“清洁低碳、安全高效”能源新体系，才能实现“双碳”目标，同时支撑我国高质量可持续发展。挑战前所未有，任务异常艰巨，在此过程中，科技创新必须发挥至关重要的引领作用。

## 1 “双碳”目标实现的必要性和紧迫性

习近平总书记多次强调，应对气候变化不是别人要我们做，而是我们自己要做，是我国可持续发展的内在要求。我国有14亿人口，要全面建设社会主义现代化，延续过去发达国家高耗能、高排放的老路是行不通的，必须转到绿色低碳的发展轨道上来，这是我国现代化的必由之路。

### 1.1 “双碳”目标实现的必要性

（1）能源结构的调整。我国是全球最大的能源生产国、消费国，充足稳定的能源供应仍然是经济高质量发展的必要条件。“富煤、贫油、少气”的能源资源禀赋和现有的能源基础设施决定了我国以化石能源，特别是以煤为主的能源结构还需持续较长一段时间。近年来，我国能源结构不断优化、能源利用效率不断提高，但仍面临着较大的能源安全和生态环境治理压力。针对能源安全问题，2014年6月13日，在中央财经领导小组第六次会议上，习近平总书记提出了推动能源的消费革命、供给革命、技术革命、体制革命和国际合作的“四个革命、一个合作”能源安全新战略。在“四个革命、一个合作”能源安全新战略的指引下，我国能源发展在“十三五”时期取得历史性成就，以能源消费年均低于3%的增速支撑了经济的中高速增长，建立起了多元清洁的能源供应体系，到2020年底，清洁能源发电装机达到10.83亿千瓦，首次超过煤电装机容量[1]。在百年未有之大变局下，能源安全的底线作用更加凸显。但是，我国石油和天然气对外依存度仍然不断攀升，2020年分别达到73%和43%[2]，能源革命仍然任重道远。针对生态环境治理压力，我国必须加速推进能源结构绿色低碳转型。“双碳”目标提出后，非化石能源因其低碳/零碳属性，获得加速发展。2021年9月，《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中提出到2025年、2030年和2060年，我国非化石能源占能源消费比重将分别达到20%、25%和80%的目标，风、光、生物质等可再生能源及核能将逐渐成为新型能源体系发展的重点。值得指出是，无论是能源安全新战略还是“双碳”目标，都是为推动我国能源结构向绿色低碳发展。二者目标一致，各有侧重，相辅相成。我们必须要立足国情，先立后破，安全、稳步优化能源结构。

（2）生产方式的变革。我国碳排放量高的根本原因在于能源及其相关的工业体系主要依赖化石资源。我国电力工业及高能耗工业（钢铁、石化、水泥、有色等）的二氧化碳排放占全国二氧化碳排放总量的80%左右，是需要重点关注的行业。在“双碳”目标下，现有的能源及工业生产结构难以长期维持，必须进行全面的革命性调整，才能与全球气候治理目标和我国高质量发展目标相适应。纵观世界工业发展历程，能源革命与工业革命历来交互发展、共同作用促进社会经济结构变革。我国的能源革命已经拉开序幕，在“双碳”目标的牵引下，能源革命也必然会促进我国工业革命的迅速开展。推动产业结构优化升级，促进传统高耗能行业绿色低碳转型，大力发展绿色低碳产业是推动经济高质量发展的必然要求。

（3）生活方式的改变。党的十九大报告指出，形成绿色发展方式和生活方式，坚定走生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展道路。习近平总书记明确要求，到21世纪中叶，绿色发展方式和生活方式全面形成，人与自然和谐共生，生态环境领域国家治理体系和治理能力现代化全面实现，建成

美丽中国[①]。2019年，我国居民人均生活能源消费仅0.31吨标准煤，人均生活能源消费产生的二氧化碳排放为0.98吨[②]。同期，美国居民人均生活能源消费2.28吨标准煤，人均生活能源消费产生的二氧化碳排放2.6吨[③]。在碳中和目标下，如果要达到与美国等发达国家相近的消费水平，除了需要发展价格低廉的非化石能源，我们还必须在全社会提倡绿色低碳生活，推动高质量发展和创造高品质生活有机结合。这同每个人息息相关，人人都应该做绿色低碳生活方式的践行者、推动者[④]。

### 1.2 "双碳"目标实现的紧迫性

（1）时间紧。中国承诺的从实现碳达峰到实现碳中和的时间远远短于发达国家所用时间。世界主要发达国家和地区都已经实现了碳达峰，欧盟早在1979年实现，美国在2007年前后，日本在2005年进入碳排放峰值平台期后最终在2013年达峰。这些国家和地区从进入峰值平台期到要实现2050年碳中和的目标，都有40—70年的时间。而我国要在短短30年左右的时间内从碳达峰实现碳中和，完成全球最高碳排放降幅，这需要付出十分艰苦的努力[⑤]。

（2）任务重。① 应对地球升温是人类社会共同面临的新问题，对应着能源以化石资源向可再生资源的大转变，国际国内都没有成熟经验可以借鉴，是人类社会走向可持续发展面临的共同难题。要在短时间内实现经济社会系统的巨大甚至颠覆性转变，需要克服一系列技术、经济、社会的巨大挑战。② 要实现中华民族伟大复兴，"能源的饭碗必须端在自己手里"[⑥]。我国仍处于工业化发展进程的中后期，伴随着经济快速发展，城镇化水平提高，人民群众生活水平不断改善，能源消费还将继续增长。据中国科学院学部重大咨询项目——"中国碳中和框架路线图研究"项目组估算，为满足经济社会发展需要，我国能源消费总量峰值将在2030—2040年达到，为60亿—64亿吨标准煤。即使实现非化石能源大规模发展，对于以化石能源特别是煤炭为主导能源、处于高速发展阶段的中国，如何在保障产业链供应链安全稳定的前提下，科学有序推进"双碳"目标，仍然面临巨大的挑战。

（3）科技创新不足。科技创新是支撑"双碳"目标实现的根本动力。经过多年发展，我国能源科技创新取得重要阶段性进展，有力保障了能源安全，促进了产业转型升级，为"双碳"目标的实现奠定了良好基础。但是，"双碳"目标下的能源结构、生产生活方式都将发生颠覆性变革，现有技术体系还难以支撑"双碳"目标的实现。要实现"双碳"目标，不仅需要突破各领域众多关键技术，更需要破除各能源种类及各能源相关行业之间的壁垒，跨领域突破多能融合互补及相关重点行业工业流程再造的关键瓶颈及核心技术，加强能源技术体系创新，重构能源及相关工业体系。跨领域系统化布局有巨大的创新空间，并带来巨大的总体节能减排效果，但同时也面临巨大挑战，是我国新能源体系构建和相关产业转型升级的重点方向和难点。

（4）国际竞争加剧。2020年以来的新冠肺炎疫

① 习近平：坚决打好污染防治攻坚战 推动生态文明建设迈上新台阶 . (2018-05-20)[2022-04-04]. http://jhsjk.people.cn/article/30000992.
② 根据《中国能源统计年鉴2020》相关数据计算，电力按电热当量折算。
③ 根据2019年美国国家温室气体清单数据计算。
④ 习近平2017年5月26日在十八届中央政治局第四十一次集体学习时的讲话 . (2017-05-28)[2022-03-30]. http://cpc.people.com.cn/n1/2017/0528/c64094-29305569.html.
⑤ 丁仲礼：碳中和对中国的挑战和机遇 . (2022-01-09)[2022-03-30]. http://www.ces.cn/news/show-140724.html.
⑥ 习近平2021年10月21日在胜利油田看望慰问石油工人时的讲话 . (2021-10-22)[2022-03-30]. http://www.news.cn/politics/leaders/2021-10/22/c_1127985292.htm。

情对全世界安全与经济发展造成了新的冲击，也引起了对全球危机问题的深刻思考。某种程度上，气候变化问题是另一种更为严重的全球危机。比尔·盖茨预言：“到2060年，气候变化可能和新冠肺炎疫情一样致命；到2100年，它的致命性可能是新冠肺炎疫情的5倍。而气候变化造成的经济损失将相当于每10年就有一次新冠肺炎疫情”⑦。在疫情肆虐的当下，全球深刻体会到人类命运共同体的内涵。气候变化作为对人类命运影响最大的问题，对其的态度与治理成为国际政治的重要角力点。中国作为全球最大的碳排放国家，必须积极参与并引领全球气候治理，塑造和维护负责任大国形象。此外，如何应对气候变化问题已经逐渐从政治领域竞争的议题转向经济贸易的全方位竞争议题。2021年7月，欧盟委员会向欧洲议会和欧盟理事会提交了设立碳边境调节机制（俗称“碳关税”）的立法议案，预计从2023年起开始对欧盟进口的部分商品征收碳税⑧。欧盟碳关税政策将对温室气体排放量高的企业带来重大挑战。波士顿咨询公司提出碳关税对行业利润的侵蚀影响可高达40%，而且整个产业链上的企业都将受到成本增加带来的影响，产品竞争力格局也将被重塑⑨。中国作为世界上最大的产品出口国，将面临巨大的挑战。

## 2 “双碳”目标实现的科技路径

理念是行动的先导，“双碳”目标的实现必须依靠变革性的理念引领。中国科学院面向国家发展清洁低碳、安全高效能源体系建设要求，基于能源领域长期研究基础，提出通过技术创新实现多种能源之间互补融合的多能融合理念，布局了一批多能融合技术的研发与示范，为科技支撑国家“双碳”目标开展了先行探索[3]。

### 2.1 多能融合理念的内涵

能源、材料和信息是现代社会发展的三大支柱。多能融合是指综合考虑能源资源在加工利用过程中的能源属性和物质（原料/材料）属性，通过新技术、新模式破除各能源种类之间条块分割、互相独立的技术和体制壁垒，促进化石能源与非化石能源、各能源分系统之间、各能源资源加工利用不同过程之间的能量流、物质流和信息流的互补融合，实现能源资源利用的能量效率、物质效率、环境效益、生态效益、经济效益和社会效益等多目标的优化。

多能融合技术是实现多能融合理念的根本。多能融合技术是指在能源资源加工利用过程中涉及的原料产品、反应过程、工程过程、系统集成等多层次、多尺度范畴中充分利用各种能源自身的相对优势，对冲消除各类能源劣势，实现能源与物质的跨系统、能源系统内跨类型的融合，达到提升能源资源综合利用效率，缓解能源和原料（材料）供需矛盾，降低能源利用的环境影响等多目标优化要求的先进技术。

基于多能融合理念，根据能源系统特征，笔者提出适合我国国情的多能融合技术“四主线、四平台”体系（图1）。“四主线”是指：化石能源清洁高效利用与耦合替代（能源安全）、非化石能源多能互补与规模应用（能源结构）、工业低碳/零碳流程再造（工业变革）、数字化/智能化集成优化（系统优化）；“四平台”是指：合成气/甲醇平台、储能平台、氢能平台、二氧化碳平台。“四主线、四平台”构成多能融合技术体系的四梁八柱，有望为“双碳”

⑦ Gates B. COVID-19 is awful, climate change could be worse. (2020-08-04)[2022-03-30]. https://www.gatesnotes.com/Energy/Climate-and-COVID-19.

⑧ 吴必轩. 欧盟“碳关税”或提前落地并更为激进——解读欧洲议会国际贸易委员会的修订意见. (2021-12-05)[2022-03-30]. http://www.eeo.com.cn/2021/1205/513791.shtml.

⑨ 波士顿：欧盟碳关税倒计时，中国制造出口将面临巨大压力. (2021-05-17)[2022-03-30]. http://www.chnmc.com/wisdom/Insights/2021-05-26/16114.html.

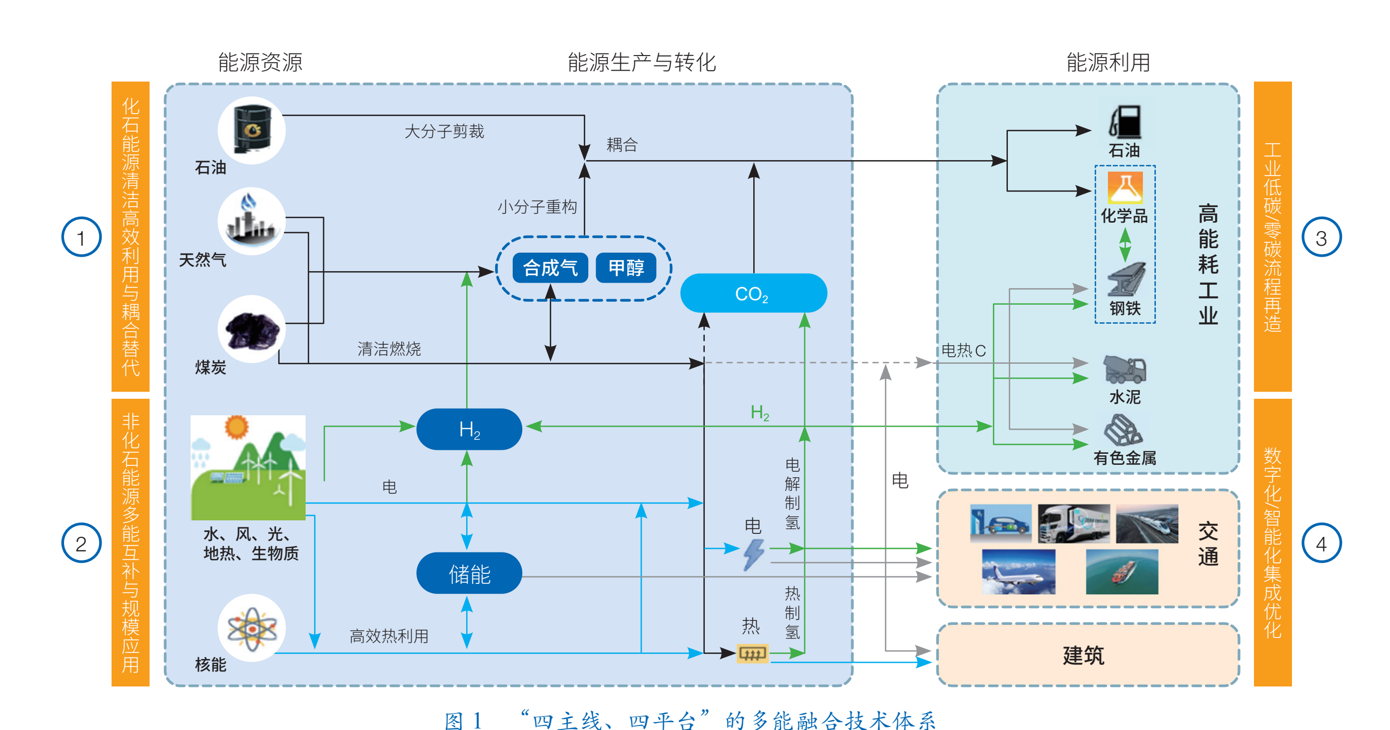



图1 “四主线、四平台”的多能融合技术体系

Figure 1 Multi-energy integration technology system of “four mainlines and four platforms”

目标下我国能源技术的系统研发提供引导。

## 2.2 多能融合技术的“四主线”

### 2.2.1 主线1：化石能源清洁高效利用与耦合替代

“双碳”转型应以保障国家能源安全为底线，以高质量发展为目标，必须首先用好化石资源特别是煤炭资源，坚持清洁高效利用道路，发挥好煤炭的“压舱石”作用。2021年9月，习近平总书记考察榆林时指出：“煤化工产业潜力巨大、大有前途，要提高煤炭作为化工原料的综合利用效能，促进煤化工产业高端化、多元化、低碳化发展，把加强科技创新作为最紧迫任务，加快关键核心技术攻关，积极发展煤基特种燃料、煤基生物可降解材料等”，这明确了现代煤化工发展的定位和方向。

煤炭清洁高效利用应主要从煤炭清洁高效燃烧和煤炭清洁高效转化两方面开展。① 煤炭燃烧方面。我国燃煤发电的能效指标、污染物排放指标均已达到世界先进水平，但工业领域煤炭清洁高效燃烧利用的科技支撑不足[4]。持续推进煤炭清洁高效发电和灵活高效发电，提高电力系统对清洁电力的接纳能力、工业锅炉（窑炉）高效燃烧和多污染物协同治理是煤炭燃烧技术发展的方向。② 煤炭转化方面。以现代煤化工为代表的转化技术与产业化均走在了世界前列，攻克了煤气化、煤制油、煤制烯烃等一大批技术和工程难题；但是，仍面临如何通过发展前瞻性和变革性技术，提高煤、水资源利用效率，实现二氧化碳的高效率转化利用，解决煤化工长期以来面临的高能耗、高水耗、高碳排放的难题。

现代煤化工的快速发展，使得煤经合成气/甲醇生产多种清洁燃料和基础化工原料成为可能，这也给石油化工和煤化工耦合替代、协调发展带来了新的机遇。采用创新技术大力发展现代煤化工产业，既可以保障石化产业安全，促进石化原料多元化，还可以形成煤化工与石油化工产业互补、协调发展的新格局[5]，例如石脑油和甲醇反应生产烯烃。石脑油是原油加工重要产品，甲醇是煤化工重要产品，二者都是烯烃生产的重要原料。在现有生产技术下，石脑油制烯烃和甲醇制烯烃是

完全不同的生产路线。但从生产过程来看，石脑油制烯烃是强吸热反应，甲醇制烯烃是强放热反应，且反应条件和催化剂类似，存在反应过程耦合的可能。基于此原理，中国科学院大连化学物理研究所创造性地将石脑油原料和甲醇原料耦合起来制取烯烃，利用反应过程中的吸热-放热平衡，提高了整个系统的能效和碳原子利用率。相比传统技术路线，吨烯烃产品能耗降低1/3—1/2，石脑油利用率提高10%。

### 2.2.2 主线2：非化石能源多能互补与规模应用

实现"双碳"目标必须逐渐稳步改变我国以煤为主的能源结构，大力发展可再生能源和安全先进核能，实现非化石能源的多能互补和规模应用。可再生能源的高比例、大规模利用将会对现有能源体系产生巨大冲击。风能、太阳能等可再生能源存在与生俱来的能量密度低、波动性强等问题，具有随机性、间歇性和波动性等特点。近年来，风、光发电并网消纳问题日益突出。随着风、光能源更大规模发展，仅靠单项技术的进步将难以完全解决风、光发电并网消纳问题，需从能源系统整体角度加以考虑。因此，可再生能源的大规模应用必须考虑多种能源的系统融合，以风、光资源作为发电和供能的主力资源，以核电、水电和其他综合互补的非化石能源为"稳定电源"，以少量的火电作为应急电源或者调节电源，通过可再生能源功率预测技术、电力系统稳定控制技术、电力系统灵活互动技术等构建新型电力系统管理和运行体系。

储能技术可有效平抑大规模可再生能源发电接入电网带来的波动性，促进电力系统运行的电源和负荷的平衡，提高电网运行的安全性、经济性和灵活性。根据2021年国家发展和改革委员会、国家能源局《关于加快推动新型储能发展的指导意见》，2025年新型储能技术的装机规模达到3 000万千瓦以上，2030年实现全面市场化发展。除电化学储能、机械储能、电磁储能外，氢能也是一种广义上的储能方式。利用可再生能源、高温核能等制取的绿氢，可以实现电力的长时期存储，并推进可再生能源向物质的无碳转化。氢作为能源的载体，可为能源的储、运、用等问题提出一系列新的解决方案。

### 2.2.3 主线3：工业低碳/零碳流程再造

工业部门是二氧化碳的排放大户，2020年其二氧化碳排放占全国总排放量的68%，主要包括钢铁、建材、化工、有色等领域。要实现这些领域的"双碳"目标，就必须对现有的工业流程进行低碳/零碳再造。① 通过深度电气化，利用非化石能源发电实现深度脱碳；② 对于难以电气化的工业流程，需借助绿氢、合成气/甲醇、二氧化碳等平台，通过技术突破和行业间的协调、融合实现低碳零碳流程再造，促进化石能源和二氧化碳的资源化利用，实现行业低碳零碳工艺革新。

案例1：绿氢与煤化工融合。煤气化变换是煤化工行业产生二氧化碳的主要过程。如果在煤气化过程中补入绿氢，可实现煤制烯烃过程的碳减排近70%；如果补入过量的绿氢，则可引入二氧化碳作为部分碳源，实现全过程的负碳排放。

案例2：钢铁与煤化工融合。钢厂尾气富含一氧化碳和氢气，可作为化工生产的原料气。如果利用钢厂尾气中含有的合成气生产乙醇，初步估算，全国钢厂25%剩余尾气约可制1 000万吨乙醇，减少二氧化碳排放近2 000万吨。

案例3：绿氢与钢铁融合。以氢气代替煤炭来还原铁矿石（氢冶金），二氧化碳排放可降至传统工艺的20%。

案例4：水泥和化工融合。水泥行业的排放主要是由于原料中碳酸钙分解产生的过程排放（约60%），这部分"不得不排放"的二氧化碳无法通过燃料替代实现减排。但如果以氢为介质与化工过程耦合，可将二氧化碳转化为甲醇等化学品，实现二氧化碳的资源化利用。此外，从多能融合的理念出发，在甲烷等气氛下进行熟料焙烧，可使碳酸钙与甲

烷反应生成一氧化碳和氢气，再作为原料制备化学品，从而实现水泥的低碳、经济发展。

#### 2.2.4 主线4：数字化/智能化集成优化

数字化、人工智能等技术的快速发展，将与第四次能源革命、工业革命和科技革命相叠加，推动社会的快速变革和发展。数字化/智能化能源系统的构建，将云计算、人工智能、5G通信等新一代数字化、智能化技术与现代能源体系的构建相融合，加速推进能量流、物质流与信息流的融合，实现系统优化，推动以绿色、数字化、高质量为核心的能源领域创新发展。例如，以信息化、数字化构建新型电力系统，建设具备云资源储存、大数据处理、数据驱动分析、高度智能化等能力的电力控制管理平台，使电网可见、可知、可控，实现智能运行，提高电网的安全性和稳定性等。

## 3 推进多能融合科技路径实施的建议

（1）进一步加强研发与应用的系统性布局。系统性布局是多能融合技术路径的核心。在现有能源系统框架下，面向碳中和远景目标，必须推进跨领域综合交叉，打破能源与其他行业、能源内各分系统间相互独立分割的局面，解决依靠单领域科技发展难以突破的跨系统问题。建议充分发挥举国体制优势，统筹全国科技优势力量，基于多能融合理念框架，跨领域系统化部署支撑“双碳”目标实现的研发系统，加速碳中和目标实现所需的科技研发。对其中的颠覆性技术，应探索建立适合颠覆性技术创新的项目申报和管理机制，如建立科技创新容错免责机制、引入社会资本进入机制等，促进颠覆性技术突破和技术成果快速转化。同时，科技成果转化为现实生产力的过程也是一个系统工程，涉及政策设计、科技攻关、产业承接和市场需求等环节，各个环节的有效衔接缺一不可。应加强有利于多能融合科技成果转化的生态建设，构建政策链、科技链、产业链和资本链“四链”融合的科技成果转化体系。

（2）进一步加强典型区域的示范带动。我国幅员辽阔，各地区资源环境禀赋和经济社会发展状况不同且极不均衡，难以用同一套技术方案解决所有地区的所有问题。因此，“双碳”工作应基于各地区资源环境禀赋、产业布局、发展阶段等实际情况，结合区域重大战略、区域协调发展战略和主体功能区战略，因地制宜推进。建议从“全国一盘棋”的高度，统筹选取一批具有典型特征的区域，针对各典型区域的主要问题开展多能融合技术的集成示范，在验证一批关键核心技术的同时，为全国同类型区域提供可操作、可复制、可推广的技术方案。并以点带面，带动全国同类型区域绿色低碳发展。

（3）进一步加强知识产权保护。可以预见，在“双碳”目标的强力驱动下，我国在面向碳中和的能源和工业体系中将产生海量的多能融合新技术和相关知识产权。建议提早布局，进一步加强知识产权保护，以此激励不同创新主体、市场主体投入多能融合技术的研发、示范和推广应用。同时，进一步完善知识产权保护的法律法规，并加大执法力度，树立典型，提高全社会对知识产权保护重要性的认识。此外，在科技成果转化过程中，应建立健全知识产权作价评估和知识产权确权分享体系，盘活知识产权价值，促进知识产权成为一种可估值、可定价和可流通的生产要素和资产。

（4）进一步加强“双碳”相关人才培养。人才是创新的第一资源。由于“双碳”问题的复杂性、技术的专业性等，需要跨学科、跨领域的创新性复合型人才。面向“双碳”新目标，现有学科分类体系下的人才培养机制已然不能适应，迫切需要以问题为导向，以任务带学科，打破学科界限，完善“双碳”教学体系，培养适应“双碳”要求的创新性复合人才。建议推动“双碳”相关学科与专业的融合，建立和完善“双碳”教学体系，加快将“双碳”理念和实践融入人才培养体系。同时，深化科教融合，充分发挥“双

碳”领域科研项目、科研平台的优势，大力培养高层次复合型创新人才，尤其是青年人才。

（5）进一步加强国际合作。“双碳”目标实现是全球应对气候变化危机的共同追求。我国应继续积极参与全球环境治理、气候治理，进一步加强能源科技领域的国际交流与合作，为世界贡献中国方案。在能源科技创新上，建议设立“碳中和国际大科学计划”，吸引国际智力参与能源科技研发；通过政策、资金支持，鼓励国外能源领域先进技术到国内开展集中示范；进一步促进国际国内科技领域的深度融合，促进人才、智力、技术的双向流动，助力“双碳”科技发展新格局的形成。

## 参考文献

1 王怡. 能源安全新战略指引能源发展取得历史性成就——国家能源局党组书记、局长章建华回应全国两会热点. 中国电业. 2021, (3): 4-5.
Wang Y. Zhang Jianhua, Secretary of the CPC Leadership Group and Director of the National Energy Administration, responds to the tot spots of the National Two Sessions. China Electric Power, 2021, (3): 4-5. (in Chinese)

2 马永生. 全面贯彻新发展理念 加快构建清洁低碳安全高效的能源体系. 人民政协报, 2021-03-08(22).
Ma Y S. Fully implement the new development concept and accelerate the construction of a clean, low-carbon, safe and efficient energy system. Journal of Chinese People’s Political Consultative Conference, 2021-03-08(22). ( in Chinese)

3 肖宇，彭子龙，何京东，等. 科技创新助力构建国家能源新体系. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 385-391.
Xiao Y, Peng Z L, He J D, et al. Science and technology innovation promotes construction of new national energy system. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 385-391. (in Chinese)

4 吕清刚，李诗媛，黄粲然. 工业领域煤炭清洁高效燃烧利用技术现状与发展建议. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 392-400.
Lyu Q G, Li S Y, Huang C R. Current situation and development suggestions of coal clean and efficient combustion technology in industry field. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 392-400. (in Chinese)

5 叶茂，朱文良，徐庶亮，等. 关于煤化工与石油化工的协调发展. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 417-425.
Ye M, Zhu W L, Xu S L, et al. Research on the coordinated development of coal chemical industry and petrochemical industry. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 417-425. (in Chinese)

# Development Path of Energy Science and Technology under “Dual Carbon” Goals: Perspective of Multi-energy System Integration

CAI Rui　ZHU Hanxiong　LI Wanjun　XIAO Yu　LIU Zhongmin*
( Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116024, China )

**Abstract**　This study first analyzes the driving factors of China’s realization of the “dual carbon” goals from the two aspects of necessity and urgency, and proposes that to achieve the “dual carbon” goals, China shall reshape the energy structure and related industrial systems in a scientific and orderly manner, in which technology innovation plays a crucial leading role. Then, based on the long-term research and deveopment in the energy field of the Chinese Academy of Sciences, the scientific and technological development path to lead the realization of the “dual carbon” goals with the concept of “multi-energy system integration” is proposed, and the connotation of the “multi-energy system integration” concept is elaborated into four technology development paths, including clean and efficient utilization and coupling substitution of fossil energy, multi-energy complementation and large-scale application of non-fossil energy, industrial low-carbon, and zero-carbon process

*Corresponding author

reengineering, and digital, intelligent and multi-energy integration. Finally, suggestions are put forward to promote the implementation of the "multi-energy integration" technology development path.

**Keywords** carbon neutrality, "dual carbon" goals, energy, industry, technology development path, multi-energy system integration



**蔡 睿** 中国科学院大连化学物理研究所副所长，中国科学院青岛生物能源与过程研究所副所长，研究员。辽宁省科技创新发展智库学术委员会副主任委员。国家能源局能源软科学研究优秀成果奖一等奖、中国科学院科技促进发展奖管理贡献奖等奖励获得者。主要研究领域：无机膜材料分离与催化，能源科技战略，科技管理与成果转化，知识产权管理等。E-mail: cairui@dicp.ac.cn

**CAI Rui** Doctor of Philosophy, Professor of Dalian Institute of Chemical Physics (DICP), Chinese Academy of Sciences (CAS). Professor Cai is Deputy Director of DICP and Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology (QIBEBT), CAS. He is also the executive leader of the Research Center for Energy Strategy, and Vice Chairman of the Academic Committee of the Think Tank of Science and Technology Innovation Development of Liaoning Province. Professor Cai holds the first prize of Excellent Research Achievements in Soft Science of Energy of National Energy Administration, the Management Contribution Award of Science and Technology for Development of CAS, etc. His main research interests include separation and catalysis of inorganic membrane materials, strategy of energy science and technology, science and technology management and achievement transformation, intellectual property management, etc. E-mail: cairui@dicp.ac.cn



**刘中民** 中国工程院院士。中国科学院大连化学物理研究所所长，中国科学院青岛生物能源与过程研究所所长，中国科学院洁净能源创新研究院院长。中国民主同盟中央常委，中国民主同盟辽宁省委会副主委，中国民主同盟大连市委会主委，大连市政协副主席。曾荣获国家技术发明奖一等奖、国家科技进步奖一等奖、何梁何利基金科学与技术创新奖、全国创新争先奖、全国五一劳动奖章等多项奖励。长期从事能源化工领域应用催化研究与技术开发，作为技术总负责人主持完成了多项创新成果并实现产业化。E-mail: zml@dicp.ac.cn

**LIU Zhongmin** Academician of Chinese Academy of Engineering, Director of Dalian Institute of Chemical Physics, Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, and Dalian National Laboratory for Clean Energy, Chinese Academy of Sciences (CAS). Member of the Central Standing Committee of the Chinese Democratic League, Deputy Chairman of the Liaoning Provincial Committee of the Chinese Democratic League, Chairman of the Dalian Municipal Committee of the Chinese Democratic League, Dalian Municipal Committee of the Dalian CPPCC. He has won the first prize of the National Technological Invention Award, the first prize of the National Science and Technology Progress Award, the Science and Technology Innovation Award of the Ho Leung Ho Lee Foundation, the National Innovation Award, and the National May 1st Labor Medal. He has been engaged in applied catalysis research and technology development in the field of energy and chemical industry for a long time. As the chief technical officer, he has completed a number of innovations and achieved industrialization. E-mail: zml@dicp.ac.cn

■责任编辑：文彦杰